



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN GEOLOGÍA

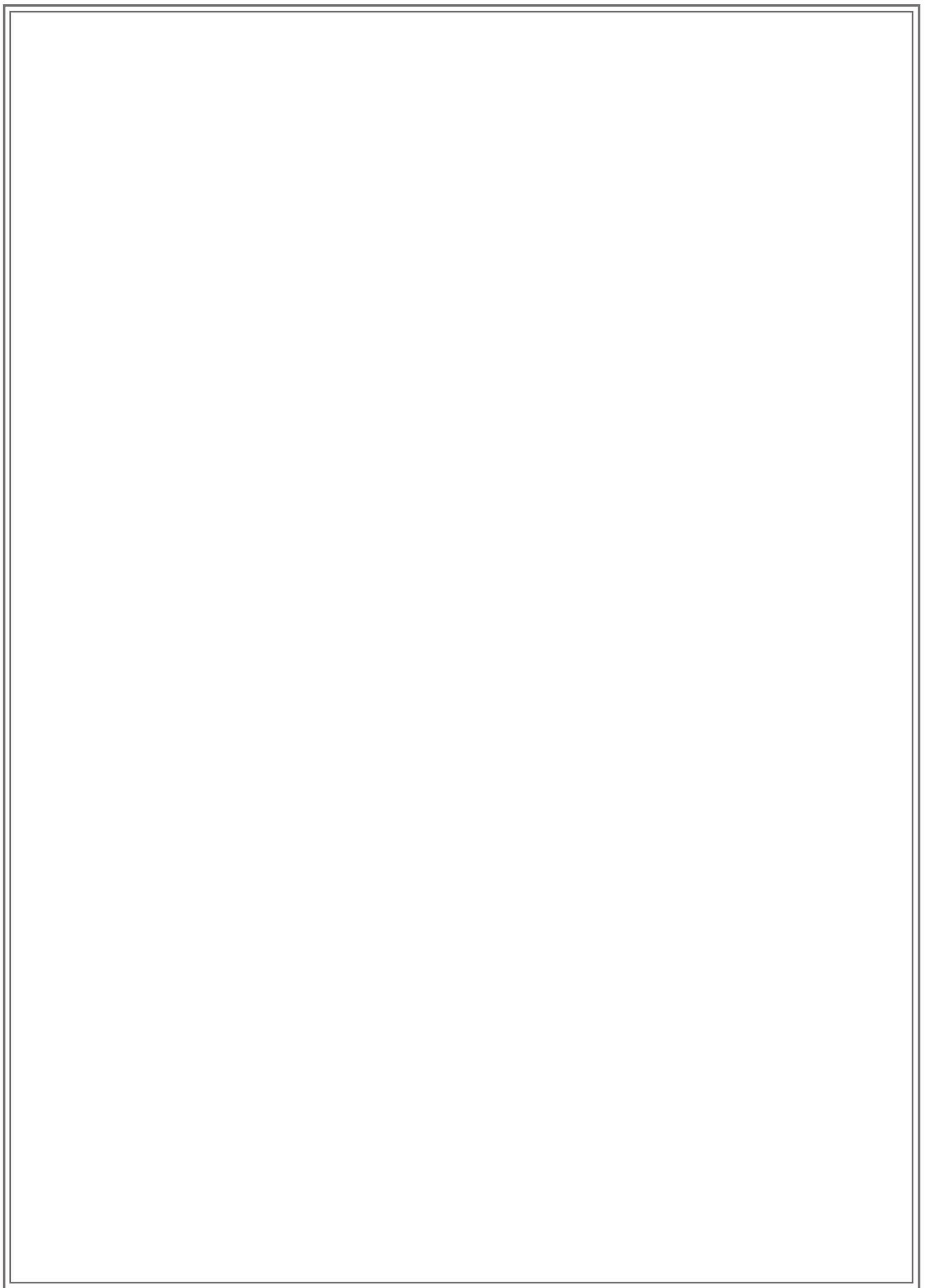
“Sedimentología y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano), Cuenca Neuquina. El rol de los flujos de fango en la depositación de espesas sucesiones de lutitas”

Germán Otharán

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2020



PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geología de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geología durante el periodo comprendido entre marzo de 2016 y agosto de 2020, bajo la dirección del Dr. Carlos Zavala, Profesor adjunto de Geología Histórica y Estratigrafía.



Lic. Germán Otharán

Certifico que fueron introducidos los cambios y correcciones sugeridas por los jurados.



Dr. Carlos Zavala

2 de septiembre de 2020

Departamento de Geología

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

*A mis seres más queridos,
en especial a mis padres,
Aníbal y Laura,
por su incondicional apoyo;
y a mi abuela "Tata",
mi gran maestra.*

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer especialmente al director de esta Tesis, el Dr. Carlos Zavala, por su absoluto apoyo durante el desarrollo de esta investigación; por su generosidad, humildad y entusiasmo para transmitir sus ideas y conocimientos; y por su dedicación para discutir y enriquecer los resultados que surgieron de este estudio.

Un reconocimiento especial a Mariano Arcuri (UNS; GCS Argentina S.R.L.), por sus valiosos aportes y sugerencias. A Mariano Di Meglio (UNS; GCS Argentina S.R.L.) y Agustín Zorzano (GCS Argentina S.R.L.) por su invaluable participación y colaboración en el trabajo de campo. Se extiende este agradecimiento a los Sres. Leandro Correa, Lucas Fuentes, Pablo Castro, Ramiro San José, Matías Rodríguez y Santiago Abranchuk, quienes mostraron una predisposición incondicional para asistir en las tareas de campo.

Al CONICET y GCS ARGENTINA S.R.L. el por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de esta investigación, la cual ha sido cofinanciada en partes iguales por ambas instituciones. GCS ARGENTINA S.R.L. proporcionó un formidable y cálido espacio de trabajo para el desarrollo de las tareas de gabinete durante el período comprendido entre abril de 2015 y diciembre de 2019.

A Denis Marchal y Guillermina Köhler (Pampa Energía S.A.), por su gestión en obtener acceso a testigos corona de la Formación Vaca Muerta, además de su interés y seguimiento continuo de esta Tesis. A Pampa Energía S.A. por el financiamiento de los estudios afines en los laboratorios de LCV S.R.L., Florencio Varela, y asimismo por permitir la publicación de los resultados de un estudio de afloramiento llevado a cabo por GCS Argentina S.R.L. en la Formación Vaca Muerta. A Pampa Energía S.A., Vista Oil & Gas, Total Austral, Exxon Mobil Exploration Argentina S.R.L., Mobil

Argentina S.A. y Gas y Petróleo de Neuquén por permitir publicar en esta Tesis los resultados de los estudios de testigos corona de la Formación Vaca Muerta.

A Maximiliano Paz (Universidad de Saskatchewan), por compartir su amplio conocimiento sobre icnología e intercambiar libremente sus observaciones e interpretaciones en la Formación Vaca Muerta.

Al Dr. Jüergen Schieber (Universidad de Indiana), por su interés y cooperación en el análisis de muestras de la Formación Vaca Muerta en la Universidad de Indiana. Asimismo, por su invitación a trabajar en el *Shale Research Laboratory* de esta misma universidad durante el segundo semestre de 2019, donde surgieron interesantes discusiones acerca de los mecanismos físicos de transporte y acumulación de las fangolitas que componen la Formación Vaca Muerta. Se extiende este agradecimiento al Ms. Zalmay Yawar (Universidad de Indiana), por su apoyo constante durante el transcurso de la investigación llevada a cabo en la Universidad de Indiana.

Al Departamento de Geología y el Laboratorio de Petrotomía de la Universidad Nacional del Sur por su colaboración, dedicación y profesionalismo en la preparación de los cortes macroscópicos pulidos y secciones delgadas analizadas en esta Tesis.

Finalmente, deseo agradecer a “Don Lalo” y “Tina” Painemilla (pobladores de Villa Puente Picún Leufú, Neuquén), por su generosidad y calidez humana cada vez que los visitamos para realizar trabajos de campo en su propiedad. Se extiende este agradecimiento a las Flias. Villa, Barros y tantas otras familias de pobladores que nos permitieron realizar estudios geológicos de superficie en sus tierras.

RESUMEN

La Formación Vaca Muerta constituye una unidad estratigráfica compuesta por sedimentitas marinas de grano fino acumuladas durante el lapso Jurásico Tardío-Cretácico Temprano en la Cuenca Neuquina, Argentina. En esta Tesis se presenta un estudio sedimentológico y estratigráfico de la Formación Vaca Muerta surgido de la integración de estudios de afloramiento a escala regional y de detalle, y estudios de subsuelo.

Los estudios de afloramiento comprendieron, por un lado, la descripción de 7 secciones estratigráficas del intervalo Tithoniano Temprano-Valanginiano Temprano distribuidas entre el centro-oeste de la provincia de Neuquén y el sur de Mendoza, a partir de las cuales se realizó un análisis estratigráfico-secuencial y se elaboró un panel de correlación regional N-S que cubre un área de 340 km. Se reconocieron cinco grupos de secuencias depositacionales (GS1-GS5), las cuales comprenden la evolución de un complejo sistema de plataforma-rampa mixta con quiebre de pendiente que abarca desde facies de interior de cuenca/talud (zona central) hasta depósitos de rampa (zona norte), facies de plataforma mixta y depósitos continentales (zona sur). Las secuencias depositacionales se componen de hem Ciclos transgresivos de espesor acotado representados por depósitos fangolíticos con abundante contenido de materia orgánica (hasta 10 % COT), y hem Ciclos regresivos con menor contenido de materia orgánica, compuestos de depósitos carbonáticos y mixtos (silicoclásticos-carbonáticos).

Por otro lado, con el objetivo de analizar los procesos de transporte y acumulación de parte de las fangolitas bituminosas que integran la Formación Vaca Muerta, se muestrearon intervalos parcialmente cementados en concreciones carbonáticas presentes en la sección condensada basal en afloramientos ubicados

en zonas internas. El estudio detallado de las concreciones (escala mm- μ m) en cortes macroscópicos pulidos, secciones delgadas y muestras de microscopía electrónica de barrido, permitió documentar procesos de transporte y acumulación a partir de flujos de fango, posiblemente desencadenados en zonas de alta pendiente ubicadas en el margen occidental de la cuenca. El transporte por tracción y en suspensión turbulenta habría dado lugar a la acumulación de capas gradadas con laminación ondulítica. Las evidencias petrográficas indican que los flujos de fango habrían sido efectivos en el retrabajo del fondo marino y la redistribución de sedimentos en zonas internas de la Cuenca Neuquina, y asimismo habrían sido importantes mecanismos para la concentración de materia orgánica en depósitos de fangolitas bituminosas (hasta \approx 6 % COT).

Los estudios de subsuelo comprendieron el análisis sedimentológico de 387 m de testigos corona correspondientes a 7 pozos exploratorios de la Formación Vaca Muerta. El análisis descriptivo de facies a escala centimétrica permitió documentar la presencia de un sistema de rampa mixta distalmente profundizada, en donde el transporte de sedimentos hacia zonas internas habría ocurrido principalmente a partir de flujos de fango de distinta naturaleza, los cuales habrían interactuado con procesos de decantación desde plumas hemipelágicas y producción biológica en la columna de agua. El patrón de apilamiento de los depósitos muestra arreglos en parasecuencias de \approx 0,5 a 3 m de espesor, las cuales se agrupan en *sets* de parasecuencias progradantes/retrogradantes que definen ciclos de alta frecuencia (10-20 m).

ABSTRACT

The Vaca Muerta Formation is a fine-grained marine stratigraphic unit accumulated during the Late Jurassic-Early Cretaceous in the Neuquén Basin, Argentina. This contribution presents a sedimentological and stratigraphic analysis of Vaca Muerta's shales emerged from the integration of regional and detailed outcrop research and subsurface data gathered from the study of different well cores.

The fieldwork comprised, on the one hand, the description of 7 stratigraphic sections of the Early Tithonian-Early Valanginian interval widely distributed across the western region of the Neuquén province and southern Mendoza province. The sedimentological and sequence-stratigraphic analysis of the different stratigraphic sections allowed integrating them into a regional N-S oriented correlation panel covering an area of 340 km. Five composite depositional sequences were recognized (GS1-GS5). They represent the evolution of a complex mixed shelf/ramp depositional system comprising from basinal/slope facies (central area) to ramp (northern area) and mixed-shelf to continental deposits (southern area). Depositional sequences are represented by thin, organic-rich (up to 10 % TOC), mudstone dominated transgressive cycles, whereas regressive cycles are commonly thicker and mainly composed of organic-lean, carbonate and mixed (carbonate/siliciclastic) facies.

On the other hand, aiming at studying the transport and accumulation processes of Vaca Muerta's organic-rich shales, hand specimen samples of early-diagenetic carbonate concretions were collected from the organic-rich basal condensed section deposited in basinal settings. Concretion samples were thoroughly examined (mm- μ m scale) integrating the observation of macroscopic polished samples, thin sections and scanning-electron microscope analyses. The evidence found inside concretions

suggest an origin related to muddy underflows, possibly triggered by slope failures on the western margin of the basin. The bedload and suspended-load transport of mud within these muddy underflows would have resulted in the accumulation of graded event mudstone beds exhibiting ripple lamination. Petrographic analysis demonstrates that muddy underflows would have been important mechanisms for reworking the seafloor and redistributing mud in basinal settings. Furthermore, muddy underflows would have been effective processes for organic matter concentration in organic-rich mudstone strata (up to $\approx 6\%$ TOC).

The subsurface studies comprised the sedimentological analysis of seven well cores of the Vaca Muerta Formation, representing a total core data of 387 m. The descriptive facies analysis at centimeter scale allowed the recognition of a distally steepened mixed ramp system. Sediment delivery to basinal settings was mainly controlled by muddy underflows triggered by different mechanisms. Deposition from muddy underflows would have interacted with fallout processes from buoyant plumes and marine snow from the water column. The stacking pattern of the studied core deposits shows ≈ 0.5 to 3 m-thick parasequences building up prograding/retrograding parasequence sets of high-order depositional cycles (10-20 m thick).